INDICE

1. I FLUSSI D'ARIA ATTRAVERSO UN EDIFICIO 3

1.1 FLUSSO DA VENTO 3

1.2 FLUSSO DA EFFETTO CAMINO 4

2. I SISTEMI DI VENTILAZIONE NATURALE 4

2.1 SISTEMI DI VENTILAZIONE PASSANTE ORIZZONTALE E A LATO SINGOLO 5

2.2 SISTEMI DI VENTILAZIONE PASSANTE VERTICALE 6

3. SISTEMI DI RAFFRESCAMENTO PASSIVO VENTILATIVO 8

3.1 RAFFRESCAMENTO VENTILATIVO MICROCLIMATICO 9

3.1.1. RAFFRESCAMENTO VENTILATIVO CORPOREO 9

3.1.2 RAFFRESCAMENTO VENTILATIVO AMBIENTALE 10

3.1.3 RAFFRESCAMENTO VENTILATIVO DELLA MASSA 10

3.2 RAFFRESCAMENTO VENTILATIVO GEOTERMICO 11

3.2.1. CRITERI PROGETTUALI 11

3.3 RAFFRESCAMENTO EVAPORATIVO 14

3.3.1 SISTEMI DI RAFFRESCAMENTO EVAPORATIVO DIRETTO A CADUTA D'ARIA 15

3.2.2. SISTEMI DI RAFFRESCAMENTO EVAPORATIVO DA STANZA 16

3.4 RAFFRESCAMENTO RADIATIVO 17

3.2.1. SISTEMI DI RAFFRESCAMENTO RADIATIVO INDIRETTO AD ARIA 17

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI 19

1. I FLUSSI D'ARIA ATTRAVERSO UN EDIFICIO

Quando, nell'involucro di un edificio, si collocano delle aperture, il differenziale di pressione tra le varie facciate – o tra zone diverse della stessa facciata – generato dal vento e/o dalla differenza di temperatura e, quindi, di densità, tra esterno e interno, da origine ad un flusso d'aria interno, che può essere usato per la ventilazione. La quantità e direzione di tale flusso e, quindi, l'efficacia relativa in termini di ricambi d'aria, dipende sia dall'area netta e dalla geometria delle aperture stesse, sia dalla loro localizzazione sull'involucro.

1.1 FLUSSO DA VENTO

Nel posizionare reciprocamente, in senso orizzontale, due, o più, chiusure esterne permeabili, valgono le regole fondamentali di seguito indicate (Fig. 1).

- Disporre le aperture sia sul lato sopravento, sia su quelli sottovento, per evitare che si determini una condizione di ventilazione insufficiente.
- Nel caso di vento perpendicolare alle facciate, con aperture su pareti opposte, sfalsarne la posizione, rispetto alla direzione del vento.
- Un vento con direzione obliqua, rispetto alle facciate dell'edificio (con angolo di incidenza non superiore a 45°), genera una ventilazione passante più efficace di quella prodotta dal vento perpendicolare, sia con aperture confrontanti, posizionate su pareti opposte, sia con aperture poste su pareti contigue.
- Se le aperture sono collocate su pareti contigue, si può avere una ventilazione efficace, anche in caso di vento perpendicolare alla chiusura sopravento, purché le chiusure stesse siano sufficientemente distanziate.

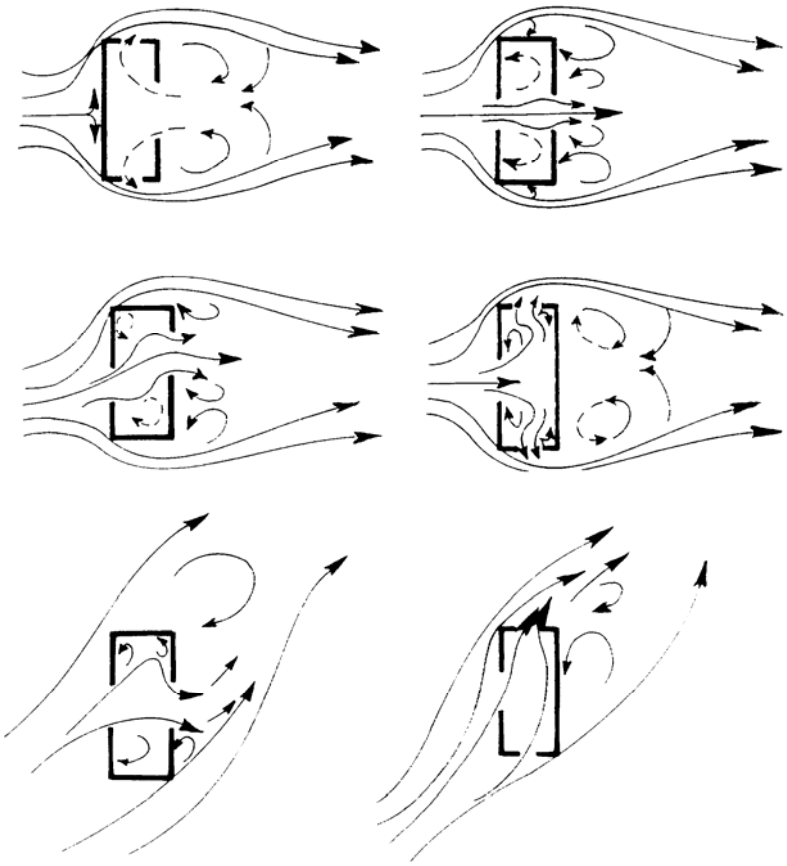

Fig. 1 – Flussi d'aria attraverso un edificio in relazione a varie configurazioni planimetriche delle aperture.

1.2 FLUSSO DA EFFETTO CAMINO

La ventilazione naturale può essere utilizzata anche in assenza di vento. In tal caso si sfrutta la differenza di densità che si stabilisce tra aria interna ed aria esterna, per effetto della differenza di temperatura dell'aria, che si determina sia per induzione meccanica – come nel caso invernale, in cui i locali sono riscaldati – sia per la funzione di controllo termico esercitata dall'involucro edilizio – come accade quando non funziona alcun impianto di climatizzazione (*free floating*).

Come si evidenzierà nei capitoli successivi, e nel documento 2b, la portata d'aria generata dall'effetto camino è funzione sia della differenza di temperatura dell'aria tra ambienti esterni ed interni, sia dalla distanza verticale tra le aperture d'ingresso (inferiori) e quelle d'uscita (superiori) dell'aria (altezza del camino termico), oltreché dell'area netta delle aperture stesse. Mentre sono sufficienti pochi gradi di Δt (1÷3) ed un'altezza del camino termico di pochi metri (1,5÷3) per generare il flusso d'aria necessario ai ricambi di base per la QAI, per ottenere portate significative per il raffrescamento ventilativo, nei giorni più caldi, sono necessarie una differenza di temperatura e un'altezza del camino termico ben maggiori.

Per tale ragione, ed anche perché in tal modo è possibile utilizzare l'effetto inerziale della massa termica dell'edificio per accumulare di notte il calore prodotto durante il giorno, l'utilizzo ottimale dell'effetto camino si ha, in periodo estivo e notturno – quando il Δt esterno/interno è massimo, per il raffrescamento ventilativo della massa.

2. I SISTEMI DI VENTILAZIONE NATURALE

I sistemi ecocompatibili di ventilazione sono caratterizzati dalla sostituzione, totale o parziale, della movimentazione meccanica dell'aria con le forze naturali del *vento* e dell'*effetto camino* – prodotto, quest'ultimo, dalla differenza di densità dell'aria determinata dalla stratificazione della temperatura dell'aria stessa in funzione dell'altezza.

Quando si ha utilizzo di sole forze naturali, il sistema di ventilazione è denominato *passivo*; quando, viceversa, si fa anche uso di movimentazione meccanica, è detto *ibrido*.

I subsistemi che compongono i sistemi di ventilazione sia passivi, sia ibridi, sono relativi alle seguenti funzioni di movimentazione dell'aria:

a. *immissione* di aria esterna pulita, attraverso i componenti apribili delle finestre o aperture *ad hoc* nelle pareti esterne, munite di griglie con o senza elementi operabili di controllo del flusso ed eventuali ventilatori (sistemi ibridi);
b. *movimentazione* dell'aria interna, al fine del ricambio dell'aria viziata, in uno o più vani comunicanti;
c. *espulsione* all'esterno dell'aria viziata, attraverso elementi analoghi a quelli citati in *a*.

In relazione alla posizione relativa delle aperture d'immissione ed espulsione dell'aria, nonché della prevalente forza motrice, la ventilazione dei sistemi *passivi* si distingue in [1]:

- *passante orizzontale* (aperture su pareti opposte, alla stessa altezza – "motore" il vento);
- *a lato singolo* (singola apertura o più aperture sulla stessa parete – "motore" il vento, se l'apertura è singola o le aperture sono alla stessa altezza; anche, o solo, l'effetto camino, se sono ad altezze diverse);
- *passante verticale* (due o più aperture su pareti opposte, a diverse altezze – "motore" il vento o l'effetto camino o entrambi);

I sistemi a ventilazione *ibridi* possono essere caratterizzati da:

- immissione d'aria a vento ed estrazione assistita da ventilazione meccanica;
- immissione assistita da ventilazione meccanica ed estrazione ad effetto camino.

2.1 SISTEMI DI VENTILAZIONE PASSANTE ORIZZONTALE E A LATO SINGOLO

Si definisce *ventilazione passante orizzontale* il flusso d'aria che attraversa uno (ventilazione *monozona*) o più (ventilazione *plurizona*) locali, con immissione e uscita dell'aria da aperture collocate su pareti opposte o adiacenti (ma non complanari), collocate alla stessa altezza dal piano di pavimento (in caso di altezze differenti, si aggiunge al vento – se vi è differenza di temperatura dell'aria tra esterno ed interno – la componente effetto camino). La portata d'aria realizzabile con tale tecnica è proporzionale all'area netta di apertura, all'angolo di incidenza del vento sul piano dell'apertura e alla differenza di pressione tra le due aperture. Tale differenza è massima per aperture collocate, rispettivamente, quella d'ingresso dell'aria sul lato sovrappressione, e quella d'uscita, sul lato in depressione (generalmente, ciò accade quando le aperture sono collocate su pareti opposte), con angolo d'incidenza del vento compreso tra la perpendicolare e 30°.

La *ventilazione a lato singolo* è, invece, il ricambio d'aria prodotto in un vano quando vi sono unicamente una o più aperture collocate sulla medesima parete esterna. Il tasso di flusso, in tal caso, è discontinuo e legato prevalentemente ad un effetto di pulsazione dell'aria, dipendente dalle variazioni di velocità e direzione che caratterizzano il vento negli intervalli brevi. La portata d'aria complessiva oraria è generalmente molto ridotta, soprattutto nel caso di una singola apertura. Se le aperture sono più d'una, la portata aumenta: per effetto camino, se esse sono collocate ad altezze diverse e vi è differenza di temperatura dell'aria tra esterno ed interno; per l'innesco di flusso da vento semi-passante, se le aperture sono collocate alla stessa altezza.

In entrambi le configurazioni, l'efficacia della ventilazione dipende, altresì, dalla profondità del vano libero in rapporto all'altezza del vano stesso e dalla eventuale presenza di partizioni, che aumentano la resistenza al flusso, riducendo ulteriormente la portata d'aria. In Fig. 2 sono riportate le massime profondità di vano, al di sopra delle quali l'efficacia di ventilazione i – per sistemi sia a lato singolo, sia passante – risulta pressoché nulla.

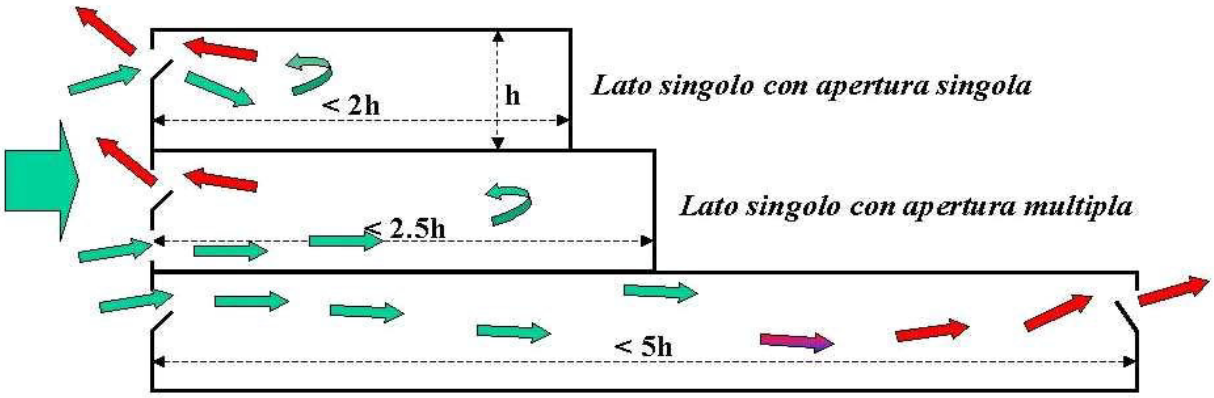

Fig. 2 – Limiti di profondità di vano per garantire efficacia di ventilazione, nei sistemi di ventilazione a lato singolo e passante (schema in basso)

i La portata d'aria media, in un dato periodo, rapportata a quella minima costante richiesta per una determinata destinazione d'uso dei locali.

2.2 SISTEMI DI VENTILAZIONE PASSANTE VERTICALE

Si distinguono sistemi di ventilazione passante verticale a ventilazione diretta e indiretta.

I sistemi *a ventilazione diretta* utilizzano aperture collocate, su pareti opposte, a diversa altezza. In tali sistemi il "motore" naturale della ventilazione può essere il *vento* o l'*effetto camino* o entrambi. Se prevale il vento, l'apertura d'immissione dell'aria è posta sopravento e più in alto rispetto a quella di uscita. Se prevale l'effetto camino, l'apertura d'estrazione dell'aria è quella collocata più in alto e deve essere posta sottovento, per evitare che l'eventuale presenza di vento contrasti con il naturale percorso dell'aria stessa dovuto al gradiente termico.

Nei sistemi *a ventilazione indiretta*, l'immissione o l'estrazione dell'aria, o entrambi, non avvengono direttamente nel locale da ventilare, ma attraverso vani adiacenti, che possono essere *specializzati*, cioè appositamente costruiti, o *generici*, in altre parole, svolgere anche – e in modo prevalente – altre funzioni.

Appartengono al primo gruppo, i sistemi di ventilazione *a torre* (Fig. 3), sia con immissione a vento – come nella tipologia del *malkaf* (Egitto, Pakistan) e del *badgir* (Iran) – sia con estrazione da effetto camino – come nei tipi *a lanternino* (*Qa'a*, Egitto) (vedi Doc. 1a) o *a doppio condotto* (alcuni tipi di torre del vento iraniana) [2]. Tali sistemi sono particolarmente adatti in condizioni di vento prevalente relativamente costante, nel periodo caldo, nonché in situazioni di contesto urbano ad alta densità edificata, in cui risulta difficile utilizzare aperture ordinarie (finestre) collocate a livello del vano per l'immissione d'aria, soprattutto ai primi piani fuori terra.

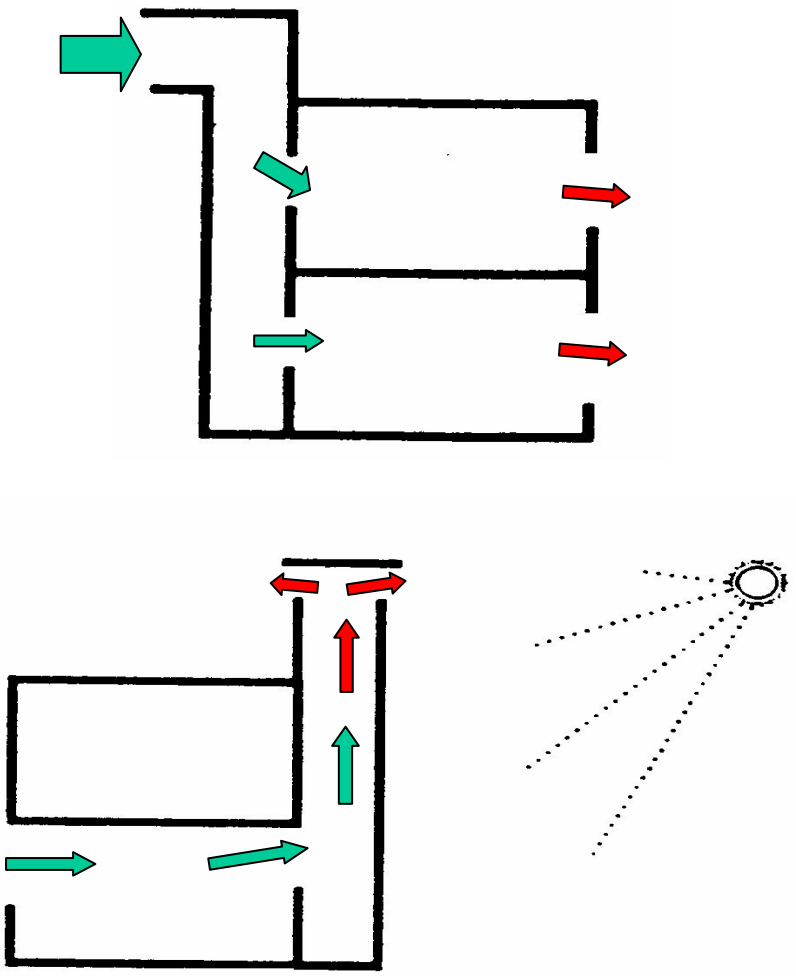

Fig. 3 – Sistema di ventilazione passante verticale a torre: a vento (sopra), ad effetto camino (sotto)

Appartengono al secondo gruppo, i sistemi di ventilazione da *atrio* (Fig. 4) e quelli da *vano-scala*. Entrambi sono applicati in edifici multipiano, in cui possono essere utilizzate le notevoli differenze d'altezza tra i vani da ventilare – particolarmente, quelli più prossimi al piano terreno – e le aperture d'estrazione dell'aria, collocate a livello della copertura od anche (se atrio e vano-scala sono perimetrali) sulle parti alte della parete esterna.

Tali sistemi comportano una particolare attenzione, in fase progettuale, alla risoluzione dei seguenti problemi:

- possibilità che l'aria viziata di un vano raggiunga i vani superiori; si evita attraverso un'accurata progettazione del profilo di sezione verticale della parete di confine tra atrio (o vano-scala) e locali, eliminando aggetti e rientranze che possono generale aree a pressione negativa e di ricircolo;
- rischio di trasporto fumi, in caso di incendio nel vano di ventilazione, riducibile utilizzando sistemi di chiusura automatica, comandate da rilevatori di fumo, delle aperture d'estrazione dell'aria;
- pericolo di surriscaldamento dell'aria negli atri perimetrali, se rivolti a sud; ciò può essere evitato con l'adozione di opportune schermature ed aumentando l'area di estrazione dell'aria.

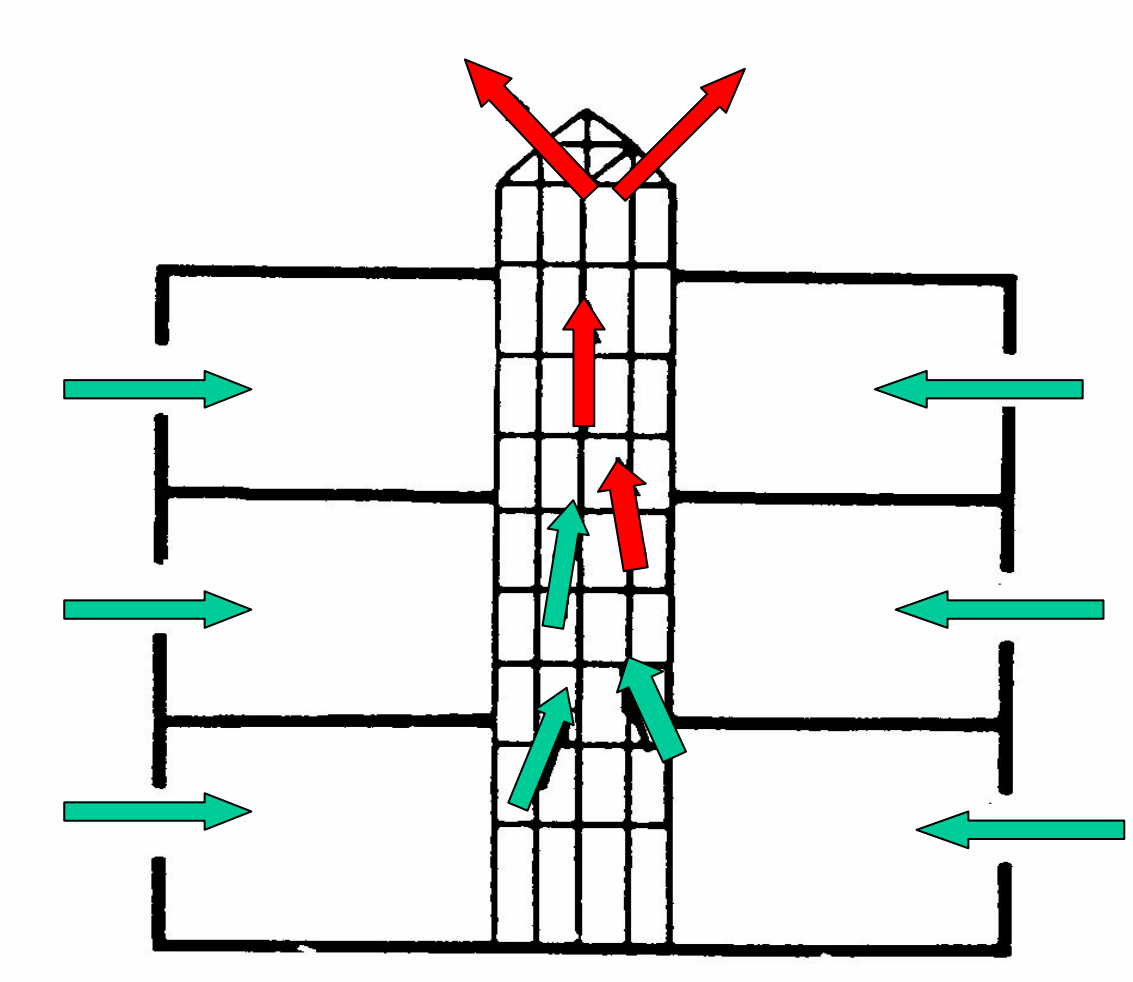

Figura 4 – Sistema di ventilazione passante verticale da atrio

3. SISTEMI DI RAFFRESCAMENTO PASSIVO VENTILATIVO

I sistemi di raffrescamento passivo ventilativo sono sistemi che utilizzano, come fluido termovettore, l'aria, e come pozzi di dissipazione del calore, media naturali – quali l'aria stessa, il terreno, l'acqua e il cielo notturno – ed anche artificiali – quali le strutture edilizie [2].

Tali sistemi sono classificabili in relazione a:

1. tipo di raffrescamento (meccanismo di dissipazione del calore);
2. tecnica di ventilazione, sia rispetto alll'uso, sia al mezzo di movimentazione del fluido;
3. pozzo termico utilizzato;
4. tecnica di di distribuzione dell'aria, sia in rapporto allo spazio, sia in relazione alla fonte energetica utilizzata;

Per ciascuno dei fattori sopra indicati sono individuabili le modalità elencate in tabella 2.

TIPO DI RAFFRESCAMENTO	**TECNICA DI VENTILAZIONE**		**POZZO TERMICO**	**SISTEMA DI DISTRIBUZIONE**	
	rispetto all'uso	**rispetto al moto**		**in rapporto allo spazio**	**in rapporto alla fonte energetica**
MICROCLIMATICO	corporea	passante orizzontale e verticale	aria esterna	diretta	naturale
	ambientale			diretta	naturale
	strutturale			diretta	naturale/ibrida
GEOTERMICO	ambientale	attraverso condotti interrati	terreno	diretta	naturale/ibrida
				indiretta	ibrida
EVAPORATIVO	ambientale	a caduta	acqua	diretta	naturale/ibrida
		attraverso unità ventilante		diretta/indiretta	ibrida
RADIATIVO	ambientale/ strutturale	attraverso collettori	cielo notturno	diretta	ibrida
				indiretta	

Le modalità indicate in tabella 2 si caratterizzano come segue.

Tipo di raffrescamento e pozzo termico

- il *raffrescamento microclimatico* indica l'effetto di dissipazione ottenuto dallo scambio convettivo tra le superfici dello spazio/elemento da raffreddare e l'aria esterna che, se ad una temperatura inferiore a quella delle superfici stesse, svolge il ruolo di pozzo termico;
- il *raffrescamento geotermico* indica il raffreddamento dell'aria di ventilazione, ottenuto tramite uno scambio termico convettivo tra aria e condotti interrati e uno scambio conduttivo tra questi ultimi e il terreno, la cui massa funge da pozzo termico;
- il *raffrescamento evaporativo* indica il raffreddamento dell'aria di ventilazione, ottenuto tramite la sottrazione di calore entalpico, determinata dal passaggio dell'aria attraverso particelle d'acqua (spruzzi di fontane, gocce da nebulizzazione, ecc.), per effetto dell'evaporazione delle stesse;
- il *raffrescamento radiativo* indica il raffreddamento dell'aria di ventilazione, ottenuto tramite il passaggio della medesima su una superficie ad alta emittanza (piastra radiante di un collettore, con intercapedine determinata da una lastra trasparente), esposta alla volta celeste notturna che, in condizioni di cielo sereno ed con bassa umidità relativa, funge da pozzo termico radiativo rispetto alla superficie, che, raffreddandosi, sottrae calore all'aria.

Tecnica di ventilazione

Rispetto all'uso:

- la *ventilazione corporea* indica che il movimento d'aria lambisce la superficie corporea degli utenti di un determinato spazio;
- la *ventilazione ambientale* indica indica che il movimento d'aria interagisce con l'ambiente da raffreddare, in presenza o in assenza di persone;
- la *ventilazione strutturale* indica che il movimento d'aria lambisce la superficie di un elemento massivo dell'edificio (solaio e/o parete), la cui composizione e le griglie/aperture di ventilazione

connesse sono state progettate *ad hoc* per poter accumulare calore durante il periodo d'utilizzo dei locali (in genere, diurno) e dissiparlo nelle ore di non utilizzo (in genere, notturne).

Rispetto al moto:

- la *ventilazione passante*, orizzontale e verticale, è stata descritta sopra, nella sezione 2;
- la *ventilazione attraverso condotti interrati* indica il passaggio d'aria, naturale (effetto camino) o forzato, in condutture collocate nel terreno, ad almeno 2 *m* di profondità, colleganti, da un lato, una presa d'aria esterna, dall'altro, l'ambiente da raffrescare o l'unità di trattamento dell'aria;
- la *ventilazione a caduta* indica un moto d'aria discensionale, naturale o forzato, in spazi/condotti a sezione ampia, per effetto di un aumento della densità dell'aria stessa dovuto a raffreddamento evaporativo e/o convettivo (scambio con acqua in condotti, in caso di umidità elevata);
- la *ventilazione attraverso unità ventilante* è relativa al passaggio forzato dell'aria attraverso unità di raffrescamento evaporativo, collocate a finestra o a parete;
- la *ventilazione attraverso collettori* è relativa al passaggio forzato dell'aria attraverso l'intercapedine di moduli radianti, costituiti – come i collettori solari – da una piastra scura, con sottostante strato isolante, un scocca di contenimento ed una lastra trasparente, e connessi ad un impianto di distribuzione dell'aria.

Sistema di distribuzione dell'aria

In rapporto allo spazio:

- i sistemi di distribuzione *diretta* sono caratterizzati dal passaggio diretto dell'aria esterna, naturale o raffreddata, nei locali da raffrescare;
- i sistemi di distribuzione *indiretta*, applicabili alle tecniche che implicano l'utilizzo di aria esterna raffreddata *ad hoc* (quelle di tabella 2 tranne la microclimatica) in presenza d'impianto di ventilazione meccanica, sono caratterizzati dal trasporto dell'aria alle unità di trattamento prima di distribuirla nei locali da raffrescare.

In rapporto alla fonte energetica:

- i sistemi di distribuzione *naturale* utilizzano i differenziali di pressione generati dal vento e dall'effetto camino, descritti nel Documento 1a (Principi d'aerodinamica ambientale);
- i sistemi di distribuzione *ibrida*, utilizzano sia tali meccanismi naturali, sia motori artificiali quali gli impianti di ventilazione e condizionamento.

3.1 RAFFRESCAMENTO VENTILATIVO MICROCLIMATICO

Il *raffrescamento ventilativo microclimatico* si può articolare nelle seguenti modalità :

a. *Raffrescamento ventilativo corporeo* (RVC) *(comfort ventilation)*, prodotto dallo scambio convettivo tra aria e pelle, per effetto sia della differenza di temperatura, sia della velocità dell'aria;
b. *Raffrescamento ventilativo ambientale* (RVA) *(free cooling),* relativo all'abbassamento della temperatura dell'aria in un ambiente confinato, per effetto dell'introduzione d'aria più fredda dall'esterno;
c. *Raffrescamento ventilativo della massa,* (RVM) *(structural cooling)*, prodotto dallo scambio convettivo tra le superfici delle strutture edilizie (pareti, pavimenti, soffitti, ecc.) ed aria a temperatura più bassa di quella delle superfici stesse.

3.1.1. RAFFRESCAMENTO VENTILATIVO CORPOREO

L'efficacia della ventilazione come mezzo di raffrescamento corporeo dipende sia dalla differenza di temperatura tra pelle ed aria, sia dalla velocità di quest'ultima.

In un individuo sano, la temperatura della pelle è, mediamente, di ca. 33 °C; per generare uno scambio termico negativo (vale a dire, dal corpo verso l'esterno), è, quindi, sufficiente ventilare con aria a temperature di poco inferiori. In realtà, tale scambio negativo genera condizioni di comfort per l'individuo solamente se si raggiungono determinati valori della cosiddetta "temperatura operante", dipendenti da molteplici fattori, interrelati in modo complesso

A parità di temperatura, l'effetto della velocità dell'aria sulla sensazione termica corporea, in termini d'abbassamento di temperatura equivalente e d'impatto percettivo generale, è, indicativamente, quello riportato in Tabella 2.

Tabella 2 – Effetto della velocità dell'aria nel raffrescamento corporeo

Velocità dell'aria [m/s]	Abbassamento di temperatura equivalente [°C]	Sensazione
< 0,25	< 1	Nessuna
0,26 ÷ 0,50	1,1 ÷ 1,6	Piacevole
0,51 ÷ 0,75	1,7 ÷ 2,2	Piacevole con consapevolezza del movimento
0,76 ÷ 1,00	2,3 ÷ 2,8	Da piacevole a leggermente disagevole
1,01 ÷ 1,50	2,9 ÷ 3,9	Da leggermente a notevolmente disagevole
> 1,50	> 3,9	Richiede interventi correttivi

Dai dati indicati in tabella 2, si desume che il limite massimo della temperatura dell'aria, per raffrescamento corporeo, sia intorno a 26 °C, con aria a velocità di poco superiore a 1 m/s. Tale valore corrisponde, infatti, al limite di comfort più i 3 °C d'abbassamento della temperatura percepita, prodotto dall'effetto di movimentazione dell'aria a quella velocità. Velocità inferiori determinerebbero, ovviamente, in proporzione, limiti più bassi della temperatura massima.

Infine, un ulteriore fattore, importante, ai fini di un efficace raffrescamento corporeo è la posizione delle aperture. Essa deve essere tale da consentire uno scambio convettivo a livello del busto, senza generare fastidiose sensazioni di "corrente", particolarmente quando la temperatura dell'aria entrante è notevolmente più bassa di quell'interna.

3.1.2 RAFFRESCAMENTO VENTILATIVO AMBIENTALE

Il raffrescamento ventilativo ambientale è generato per introduzione in un ambiente confinato d'aria più fredda che quell'interna, con l'obiettivo di portare quest'ultima entro limiti di comfort per temperatura e umidità relativa. RVC, RVA, e RVM sono tecnicamente analoghi: operano tutti attraverso l'introduzione di aria più fredda in un ambiente confinato; ma, mentre il primo non può che avvenire in presenza di persone e l'ultimo, generalmente, si attua in assenza, il secondo opera sia in presenza, sia in assenza, d'occupanti. Le tre modalità sono complementari, ma non intercambiabili: con RVC si ha sempre anche RVA, mentre RVA si può attuare anche senza RVC, anzi, può creare, per periodi limitati, condizioni tali da non renderlo necessario. Il RVA induce sempre anche RVM, se l'edificio da raffrescare ha una massa edilizia relativamente consistente, per quanto i risultati non siano paragonabili a quelli prodotti da tecnologie di RVM specificamente finalizzate.

I limiti di temperatura cui può operare efficacemente il RVA, sono inferiori a quelli del RVC, non intervenendo necessariamente l'interazione sensoriale con l'utente: in genere, il limite superiore è pari alla temperatura di set point estiva (26 °C), mentre quello inferiore può scendere anche molto sotto a 20 °C, in assenza di persone, come avviene per il RVM.

Le forze motrici del flusso d'aria necessario per indurre raffrescamento ventilativo – sia RVA, sia RVC e RVM – sono il vento e l'effetto camino, integrate con movimentazione meccanica dell'aria da attivare in caso di necessità, nei sistemi passivi ibridi

3.1.3 RAFFRESCAMENTO VENTILATIVO DELLA MASSA

È una tecnica generalmente applicata ad edifici non residenziali che consiste nell'introduzione d'aria in ambiente nel periodo serale e notturno tramite aperture posizionate in modo tale da indurre un flusso lambente superfici interne di strutture massive (solai, pavimenti, pareti) (Fig. 5).

L'efficacia del sistema è dipendente da:

- livello d'escursione termica giornaliera;
- quantità e posizione della massa esposta in grado di assorbire il calore prodotto nell'ambiente durante il giorno;
- posizione delle aperture
- velocità dell'aria.

In relazione alla diminuita ventosità nelle ore notturne, i sistemi di RVM sono generalmente ibridi (utilizzano ventilatori per la movimentazione dell'aria).

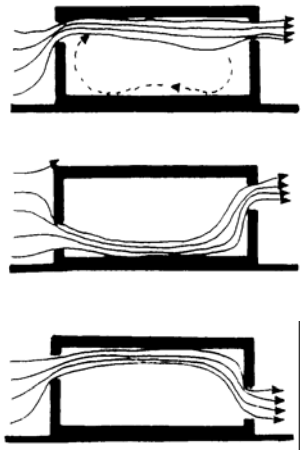

Fig. 5 – Flussi d'aria interni per il raffrescamento di strutture massive (solai, pavimenti, pareti)

3.2 RAFFRESCAMENTO VENTILATIVO GEOTERMICO

Nei sistemi di raffrescamento ventilativo geotermico, il trasferimento del calore, tra ambiente interno e terreno, avviene per mezzo dell'aria, che circola in condutture a contatto con il terreno profondo e, quindi, si raffredda prima di entrare in ambiente. L'aria è fatta circolare attraverso condutture interrate, tramite un ventilatore (sistemi ibridi) o sistemi passivi operanti per effetto Bernoulli-Venturi (estrattori sottovento) e camino (finestre alte, aperture di colmo).

I sistemi di raffrescamnto ventilativo geotermico possono avere due modalità di circolazione dell'aria:

a. *Ciclo aperto* – il sistema immette aria esterna nell'edificio, dopo averla raffrescata tramite il passaggio in terreno; in tal modo si unisce la funzione di raffrescamento a quella di ventilazione (necessita di filtro);
b. *Ciclo chiuso* – il sistema raffredda l'aria interna tramite le condotte interrate, ma senza immettere l'aria di queste ultime in ambiente; il fabbisogno di ventilazione deve essere soddisfatto separatamente.

3.2.1. CRITERI PROGETTUALI

Nella progettazione di sistemi di scambio indiretto terreno-edificio a circolazione d'aria, si deve tenere conto dei seguenti criteri generali.

Dimensioni:

- lunghezza minima dei condotti di 10 m;
- diametro del condotto variabile da 20 a 30 cm;
- profondità a cui collocare i condotti, compresa tra 1.5 e 3 m;
- velocità dell'aria all'interno dei condotti, compresa tra 4 e 8 m/s.

Aspetti qualitativi:

- Nel collocare i condotti nel terreno, si deve porre particolare attenzione al contatto tra superfici degli stessi e terreno circostante, al fine di garantire uno scambio termico ottimale. A tale riguardo, è utile

posizionare, attorno alla tubazione, uno strato di 5 cm di sabbia, che ha una buona conduttività termica ed evita il formarsi di bolle d'aria; ciò potrebbe verificarsi ponendo il condotto a contatto diretto con il terreno comune, e ne diminuisce la conduttività.

- Un altro problema cui occorre prestare particolare attenzione è la possibilità di condensa all'interno dei condotti, o d'evaporazione dell'acqua accumulata. Tali fenomeni possono, infatti, favorire la formazione di muffe e la coltura di microorganismi nocivi, influenzando negativamente la qualità dell'aria immessa nell'edificio. A titolo esemplificativo, in una località con una temperatura media massima di 29 °C e un'umidità relativa del 62% (Milano, luglio), sarebbe sufficiente che la temperatura all'interno dei condotti scendesse a 20 °C per provocare la formazione di condensa. Le opzioni tecnologiche per risolvere il problema, non necessariamente alternative fra di loro, sono:·*a)* posizionare le tubazioni in pendenza (1%) e praticare dei fori alla base del gomito inferiore del condotto; *b)* collocare filtri appropriati all'uscita del condotto.

Il sistema di raffrescamento ventilativo attraverso condotti interrati storicamente più noto è quello dei *Covoli di Costoza*. Questi rappresentano un interessante sistema di raffrescamento, applicato ad alcune ville venete palladiane, che utilizza l'aria fredda proveniente da grandi cavità sotterranee, i covoli, situate all'interno delle colline sulle quali sorgono le Ville, nonché dai loro prolungamenti artificiali realizzati in epoca Romana a fini estrattivi.

I covoli sono collocati a monte delle ville e l'aria circola naturalmente verso valle per effetto gravitazionale (l'aria fredda nelle cavità è più pesante di quella, più calda, esterna) sino a raggiungere l'interno dell'abitazione (Fig. 6). Il sistema è piuttosto efficace, come dimostrano risultati di misure della temperatura dell'aria in diversi punti dei condotti e delle abitazioni [3].

Tra le più recenti applicazioni di un sistema di raffrescamento ventilativo geotermico, vi è quello applicato all'atrio della Facoltà di filosofia dell'Università di Ioannina, in Grecia [4]. Il clima del luogo è tra i più freddi della Grecia, d'inverno, e caldo-umido, d'estate. All'atrio, che ha una superficie di pavimento di 700 m2, sono stati applicati, oltre che il sistema di raffrescamento con canali sotterranei, anche tecniche di controllo solare e ventilazione per effetto camino. Il sistema è composto di cinque condotti lunghi 30 m, di 15 cm di diametro, collocati ad una profondità di 2 m e con velocità dell'aria circolante di 3 m/s. Misure di temperatura dell'aria condotte in agosto hanno dimostrato l'efficacia del sistema: con temperature dell'aria esterna caratterizzate da picchi superiori ai 35 °C, la temperatura interna all'uscita dei condotti si è mantenuta intorno ai 25 °C.

Un'applicazione recente è il sistema ventilativo geotermico ([ii]), integrato all'impianto di condizionamento, progettato per la sede della Consalud (Compagnia di assicurazione sanitaria) e costruito a Santiago del Cile (Fig. 7a,7b). Il sistema prevede il passaggio d'aria verticale attraverso i pilastri metallici, opportunamente dimensionati, che costituiscono la struttura portante dell'edificio. La distribuzione orizzontale avviene attraverso condotti a soffitto, in mandata, e dal plenum sottopavimento, per il ritorno.

Il flusso d'aria utilizza: in immissione, dall'esterno all'Unità di Trattamento (UTA), sempre i pilastri centrali; in mandata, dall'UTA ai locali da climatizzare, i pilastri della parete fredda (esposizione Sud); in estrazione, dai locali all'esterno, i pilastri della parete calda (esposizione Nord).

Il sistema prevede anche la connessione, attraverso una valvola a quattro vie, con una batteria di collettori solari ad aria posti sul tetto, che svolgono una duplice funzione: preriscaldamento dell'aria che è inviata all'Unità di Trattamento (UTA); estrazione dell'aria dai locali, quando il sistema funziona in modalità raffrescamento [5].

[ii] Concezione e consulenza scientifica dei Proff. Grosso e Oliaro, progettazione architettonica dello studio May y Soler, assistenza tecnica degli architetti Giancarlo Dell'acquila e Mario Voerzio.

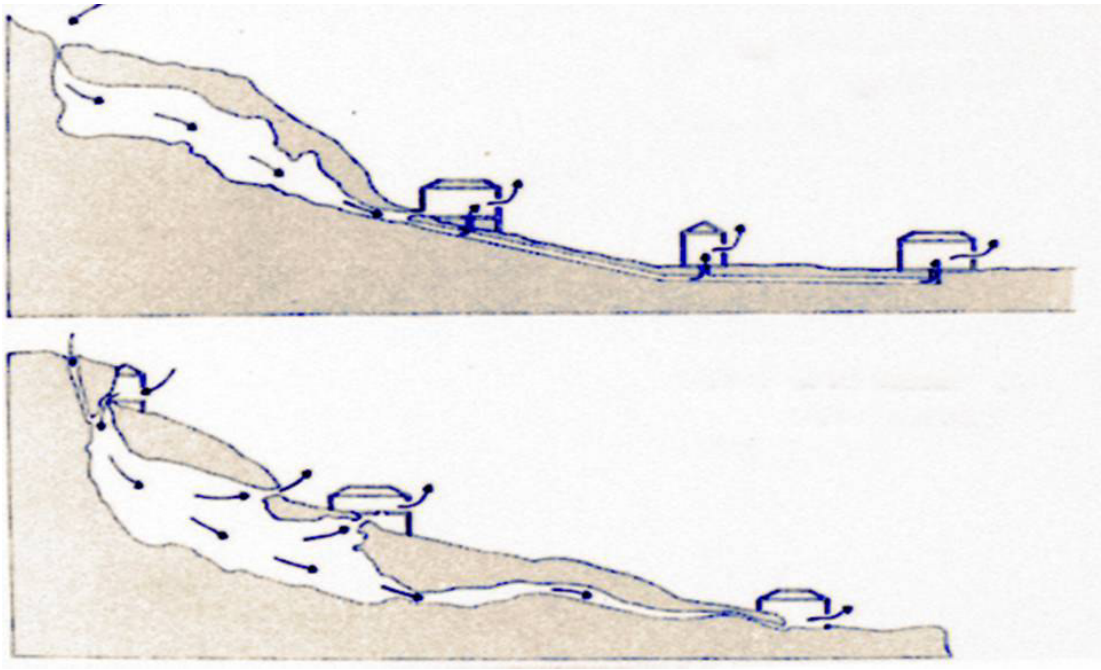

Fig. 6 – Raffrescamento da terreno indiretto, attraverso condotti sotterranei (naturali e artificiali), nelle ville "palladiane" di Costoza

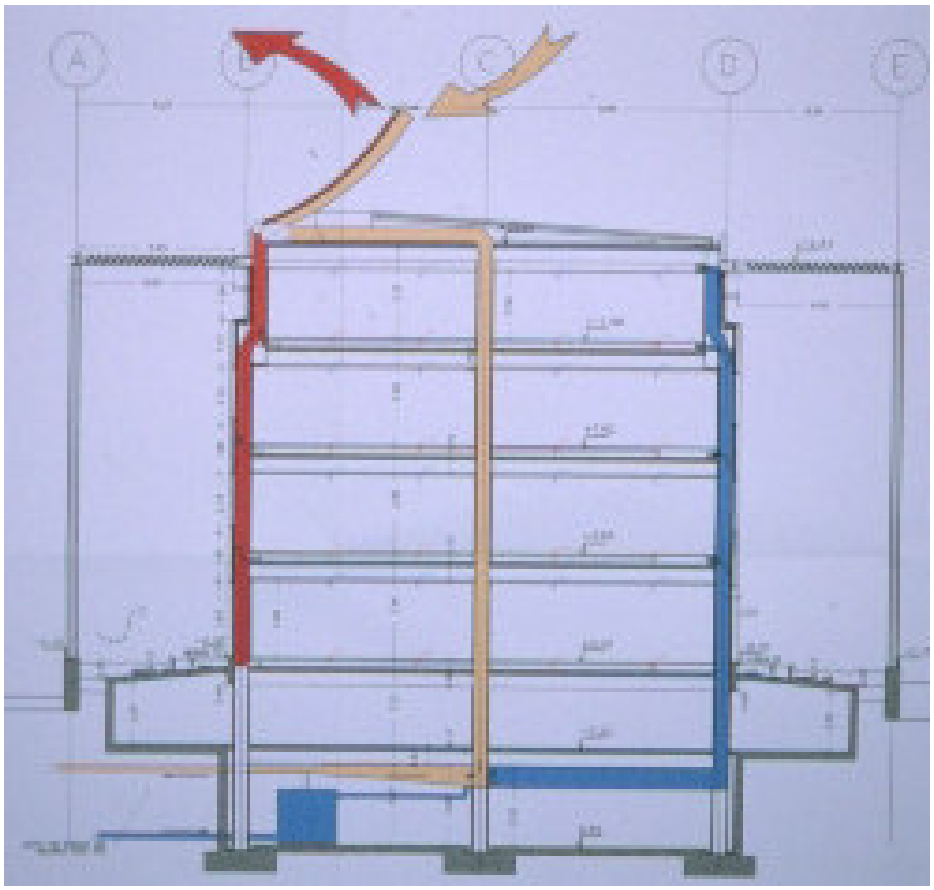

Fig. 7a – Edificio per uffici con impianto di condizionamento dell'aria integrato con sistemi bioclimatici, Santiago del Cile, 1999: schema di funzionamento in modalità *raffrescamento*

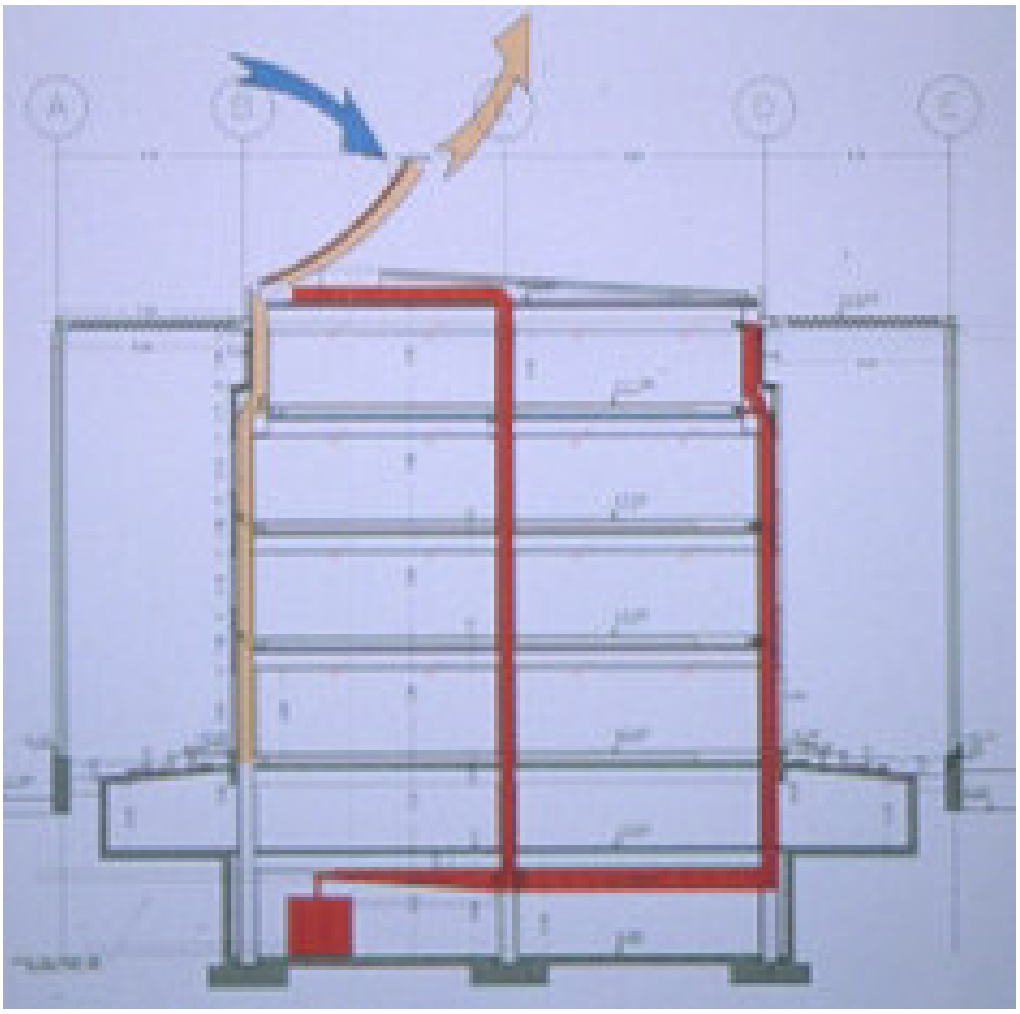

Fig. 7b – Edificio per uffici con impianto di condizionamento dell'aria integrato con sistemi bioclimatici, Santiago del Cile, 1999:schema di funzionamento in modalità *ris caldamento*

3.3 RAFFRESCAMENTO EVAPORATIVO

Il raffrescamento evaporativo (RE) è un processo in cui l'effetto dell'evaporazione del contenuto d'acqua dell'aria è utilizzato come pozzo termico naturale; il calore sensibile dell'aria è ceduto alle molecole d'acqua sotto forma di calore latente, al fine di consentirne l'evaporazione. La quantità di calore sensibile assorbito dipende dall'ammontare d'acqua che può essere evaporata.

Le tecniche di raffrescamento evaporativo hanno radici antiche di migliaia d'anni e si sono sviluppate, in modo particolare, in Egitto e in Persia [6]. I sistemi moderni di raffrescamento evaporativo sono basati su prototipi sviluppati in U.S.A. nei primi anni di questo secolo [4].

I sistemi di raffrescamento evaporativo utilizzano, principalmente, due tecniche di ventilazione: a caduta, attraverso ampi cavedi o torri o atria; attraverso unità ventilanti, con flusso orizzontale. Per quanto riguarda la fonte energetica, nel primo caso, la distribuzione può essere naturale o ibrida, nel secondo caso, è sempre ibrida. In rapporto allo spazio, il primo tipo è sempre diretto, mentre il secondo, può essere sia diretto, sia indiretto. Nei sistemi diretti, l'aria viene a contatto con l'acqua e aumenta, quindi, il suo tasso d'umidità relativa; nei sistemi indiretti, lo scambio avviene tra aria e massa d'acqua, o una piastra d'evaporazione, senza immissione dell'aria in ambiente, per cui il contenuto d'umidità dell'aria non è alterato.

.

3.3.1 SISTEMI DI RAFFRESCAMENTO EVAPORATIVO DIRETTO A CADUTA D'ARIA

Tra i sistemi di raffrescamento evaporativo diretto a caduta d'aria, vi è la torre di raffreddamento evaporativo, in cui, all'effetto di raffrescamento convettivo della massa muraria, tipico della torre del vento iraniana descritta nel documento 1b, si aggiunge quello evaporativo, prodotto dall'immissione d'acqua – contenuta in giare o pannelli spugnosi, o spruzzata – nel condotto d'ingresso dell'aria. L'aria, raffreddata dal meccanismo evaporativo e, quindi, resa più pesante, scende lungo la cavità della torre – aiutata, generalmente, dal vento o da un ventilatore – ed è richiamata da aperture d'uscita, collocate sulle pareti perimetrali dell'ambiente, possibilmente sui lati sottovento.

Uno studio sperimentale sulle prestazioni di una torre di raffreddamento evaporativo è stato condotto dalla Desert Architecture Unit dell'Università Ben-Gurion, nel Negev (Israele) [4]. La torre è collocata al centro di una corte di 500 m2 coperta con vetro selettivo (riflettente ad angoli d'incidenza solare alti), in un complesso edilizio di 1500 m2 di superficie coperta, d'altezza da uno a tre piani, localizzato nella zona arida degli altopiani del Negev, nel Sud d'Israele; ha struttura in tubolare d'acciaio e involucro in PVC leggero, con sezione circolare di 3,75 m di diametro ed altezza effettiva di 10 m.

L'aria è forzata verso il basso tramite un ventilatore ad elica con pala di 120 cm, collocato in cima alla torre, ad un tasso di flusso nominale di 36.000 m3/h. L'acqua è spruzzata, all'imbocco della cavità subito sotto il ventilatore, attraverso due tipi di strumenti – nebulizzatori fini e spruzzatori più grossolani, del tipo doccia – in diverse configurazioni (Fig. 8).

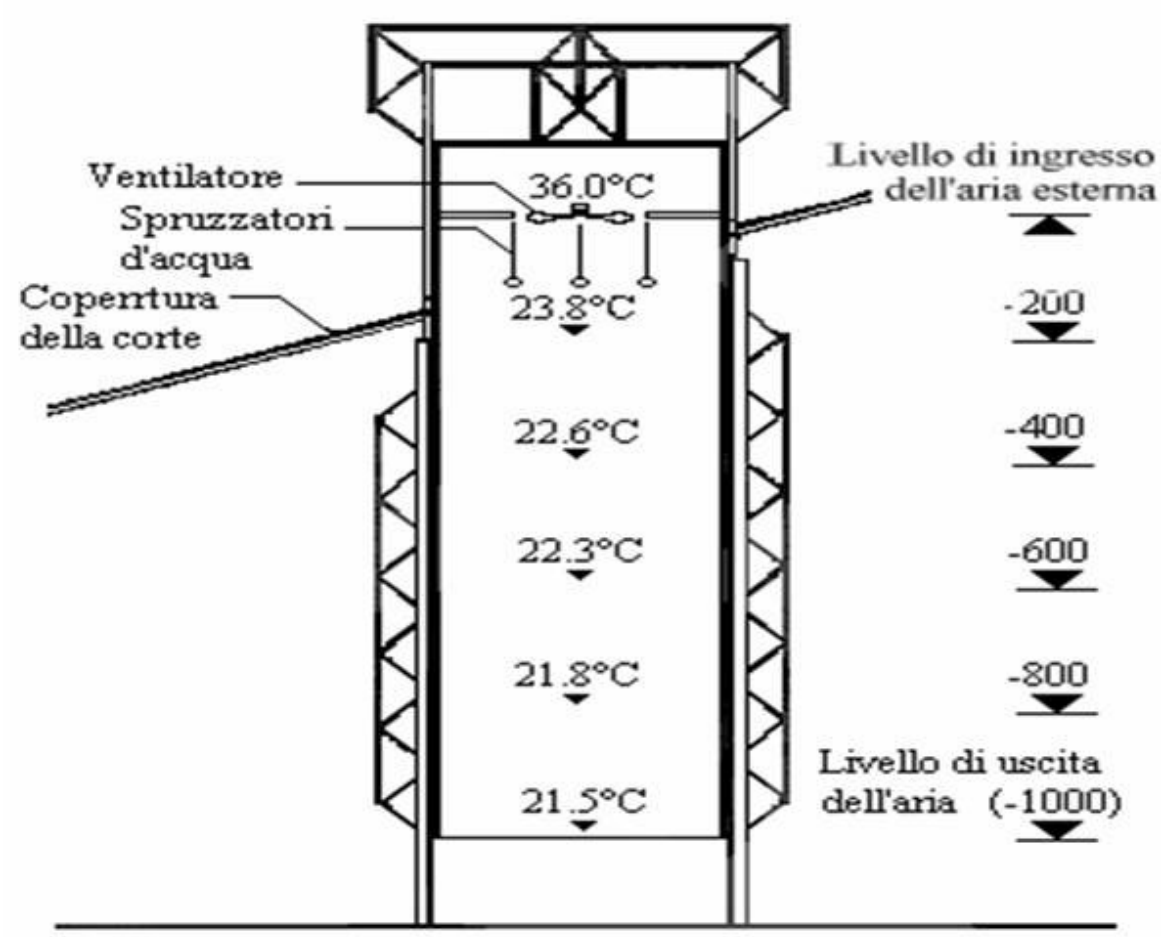

Fig. 8 – Sezione della torre di raffreddamento evaporativo utilizzata in un complesso edilizio localizzato nel Negev (Israele) e relativa stratificazione della temperatura dell'aria

3.2.2. SISTEMI DI RAFFRESCAMENTO EVAPORATIVO DA STANZA

I sistemi di raffrescamento evaporativi da stanza sono sistemi ibridi, che utilizzano apparecchiature di scambio aria/acqua da applicarsi a parete. L'aria è forzata, con ventilatori, ad entrare nell'ambiente da raffrescare, dopo essersi raffreddata per effetto dell'evaporazione, che avviene per contatto diretto aria/acqua (sistemi RED) o per scambio convettivo indiretto (sistemi REI) tra aria e condotti d'acqua. Uno schema del funzionamento dei sistemi evaporativi da stanza è rappresentato in Fig. 9.

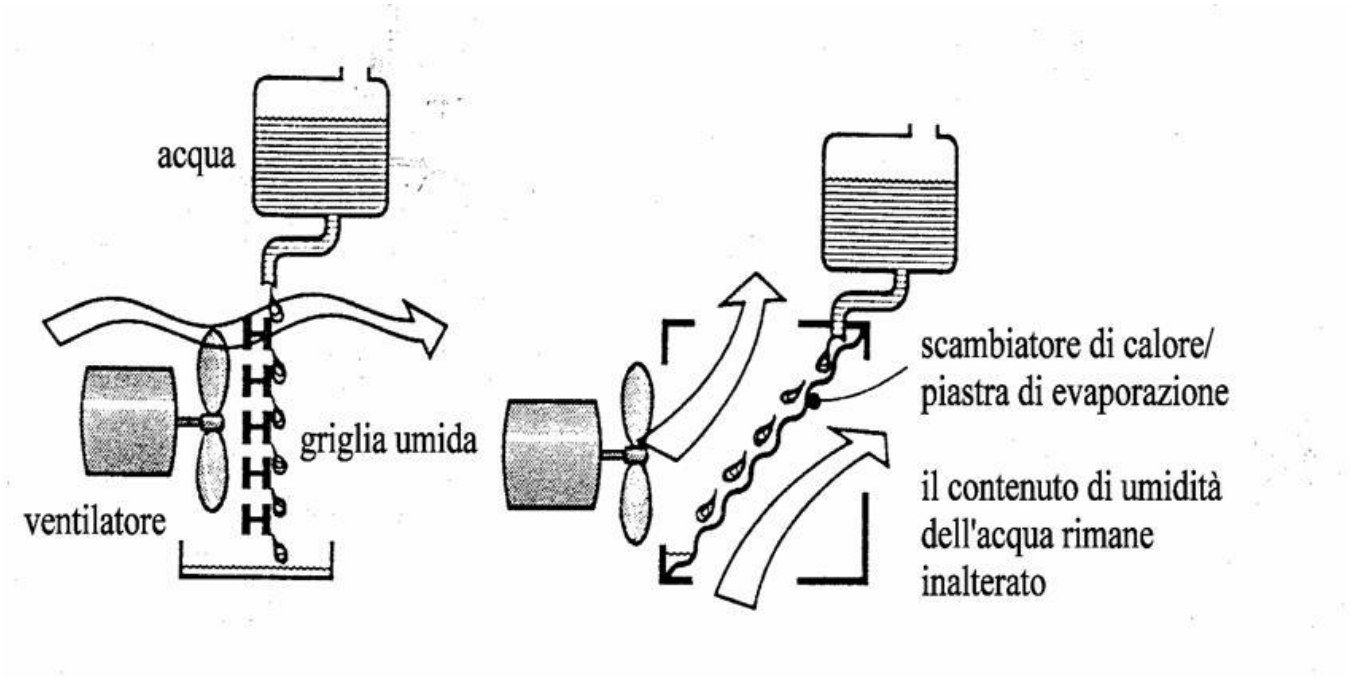

Fig. 9 – Configurazione schematica di sistemi RE da stanza: raffrescamento diretto (sinistra) e indiretto (destra)

I sistemi RED da stanza sono composti dai seguenti elementi: una superficie bagnata su cui si attua l'evaporazione; una pompa d'acqua e un ventilatore; un sistema di eiezione dell'acqua; un bacino di raccolta delle gocce d'acqua non evaporate; un serbatoio d'acqua con valvola di regolazione per mantenere il medesimo livello dell'acqua; un involucro contenente l'intero sistema. La loro efficienza di raffreddamento varia dal 60 al 90% e sono classificabili in funzione del tipo di superficie bagnata; i principali sono: a goccia, a spruzzo e a superficie rotante.

I sistemi REI da stanza operano attraverso uno scambiatore di calore tra un circuito primario dell'aria, in cui avviene l'evaporazione, ed uno secondario, in cui l'aria si raffredda, ed entra in ambiente, senza modificare il suo contenuto d'umidità. Essi possono operare solamente se la temperatura a bulbo umido dell'aria interna è inferiore a quella esterna, con limiti pratici di funzionamento corrispondenti a valori di temperatura a bulbo umido dell'aria, inferiori a 21°C, per l'aria interna, e a 24 °C, per l'aria esterna. La loro efficienza di raffreddamento varia dal 60 al 80%.

I sistemi REI da stanza sono composti dai seguenti elementi: lo scambiatore di calore in cui avviene l'evaporazione; due ventilatori, generalmente centrifughi; due filtri, uno all'ingresso dell'aria esterna nell'unità di raffreddamento, l'altro all'uscita dell'unità, prima dell'ingresso dell'aria nell'ambiente da raffrescare; una pompa, un sistema di eiezione e un serbatoio, dell'acqua. Essi si distinguono in relazione al tipo di scambiatore di calore, che può essere: a tubo, a piastra, a superficie rotante.

I sistemi REI da stanza hanno costi di gestione bassi, come quelli diretti, con il vantaggio, rispetto a questi ultimi, di non richiedere il controllo dell'umidità, dal momento che non rilasciano vapore acqueo nei locali raffreddati.

Quando siano richieste temperature a bulbo secco inferiori a quelle raggiungibili dai sistemi RE da stanza sopra descritti, si possono utilizzare sistemi RE a due fasi, composti dalla combinazione d'unità RED e REI. L'associazione dei due meccanismi comporta un abbassamento dei livelli di soglia, sotto i quali il sistema non funziona in modo efficiente, riducendo, quindi, le ore di funzionamento ed il consumo energetico. Inoltre, raggiungendo minori temperature a bulbo secco dell'aria interna, il sistema di RE a due fasi produce condizioni di comfort migliori nell'ambiente interno, a parità di condizioni climatiche esterne, rispetto a quello ad una fase.

3.4 RAFFRESCAMENTO RADIATIVO

Il raffrescamento radiativo è basato sul meccanismo del trasferimento di calore per irraggiamento, nello spettro dell'infrarosso (onde lunghe), da un corpo ad un altro a temperatura più bassa, che svolge la funzione di pozzo termico. In edilizia, il corpo caldo è l'edificio, il pozzo termico è il cielo – particolarmente, quello notturno – la cui temperatura è più bassa della maggior parte degli oggetti sulla superficie terrestre.

Vi sono due tecniche principali di raffrescamento radiativo:

a. *raffrescamento radiativo diretto* (RRD), relativo alla perdita di calore per irraggiamento dall'involucro edilizio al cielo, che ha l'effetto di incrementare il raffrescamento degli ambienti interni;
b. *raffrescamento radiativo indiretto* (RRI), in cui il radiatore non è l'involucro edilizio, ma un componente specifico che raffredda un fluido vettore (acqua o aria), che a sua volta raffredda la massa muraria o l'ambiente.

I sitemi di raffrescamento radiativo per ventilazione appartengono agli RRI. Vi sono anche sistemi di raffrescamento radiativo che utilizzano le due tecniche in modo combinato. In ogni caso, la parte d'edificio utilizzabile in modo più efficiente per il raffrescamento radiativo è il tetto e, in particolare, quello piano o a falde poco inclinate. Lo scambio radiativo per irraggiamento tra due superfici, infatti, è direttamente proporzionale al loro fattore di vista; se una di queste è piana – come la falda di un tetto – e ne "guarda" una semisferica (il cielo), il fattore di vista è massimo quando la superficie stessa è orizzontale.

3.2.1. SISTEMI DI RAFFRESCAMENTO RADIATIVO INDIRETTO AD ARIA

I sistemi di RRI ad aria sono caratterizzati da trasferimento del "freddo" – tramite il fluido vettore aria – all'ambiente da raffrescare, o ad una massa d'accumulo, che può non essere a contatto con la struttura radiante (il tetto), a differenza di quanto accade nei sistemi di RRD.

Tali sistemi, sono basati, essenzialmente, su uno schema impiantistico analogo a quelli per il riscaldamento, utilizzante componenti di scambio radiativo simili ai collettori solari piani, ma senza vetro (non trasparente all'emissione ad onde lunghe); i collettori possono essere collegati, tramite apposite condutture: *a)* direttamente all'ambiente da raffrescare; *b)* ad una massa d'accumulo, collocata in adiacenza all'ambiente da raffrescare (ad esempio, sotto il pavimento); *c)* ad un impianto convenzionale di condizionamento dell'aria.

Il componente di scambio radiativo è costituito, essenzialmente, da quattro strati, pre-assemblati in forma di pannello o assemblati in sito; questi sono, dall'esterno verso l'interno: una lastra radiante (metallica), il canale di flusso del fluido, l'isolamento termico, la struttura di supporto. La lastra radiante è raffreddata per esposizione al cielo notturno e riceve il calore contenuto nel fluido sottostante; questo, a sua volta, si raffredda ed è trasportato, attraverso un ventilatore (circolazione ad aria) od una pompa (circolazione ad acqua), rispettivamente, all'ambiente, o alla massa d'accumulo, da raffrescare.

Nella sua forma più semplice, un sistema di raffrescamento a circolazione d'aria funziona come rappresentato in Fig. 10; in tale schema, la lastra radiante coincide con il manto di copertura (in lamiera metallica), il canale di flusso con l'intercapedine d'aria e la struttura di supporto con la soletta della falda (che può essere isolata).

Il principale limite d'applicazione dei sistemi di raffrescamento radiativo è di tipo climatico: le zone a clima umido non sono idonee a tali sistemi, in quanto l'umidità assorbe la radiazione proprio nell'intervallo ad onde lunghe dello spettro. Un altro problema, che ha, finora, impedito il diffondersi di tali sistemi, nonostante ve ne siano le potenzialità di sfruttamento nel bacino del Mediterraneo, è il costo elevato, legato

sia ai meccanismi di controllo delle parti operabili, sia, nel caso di sistemi a raffrescamento diretto, alla costruzione, sul tetto, della massa elevata richiesta.

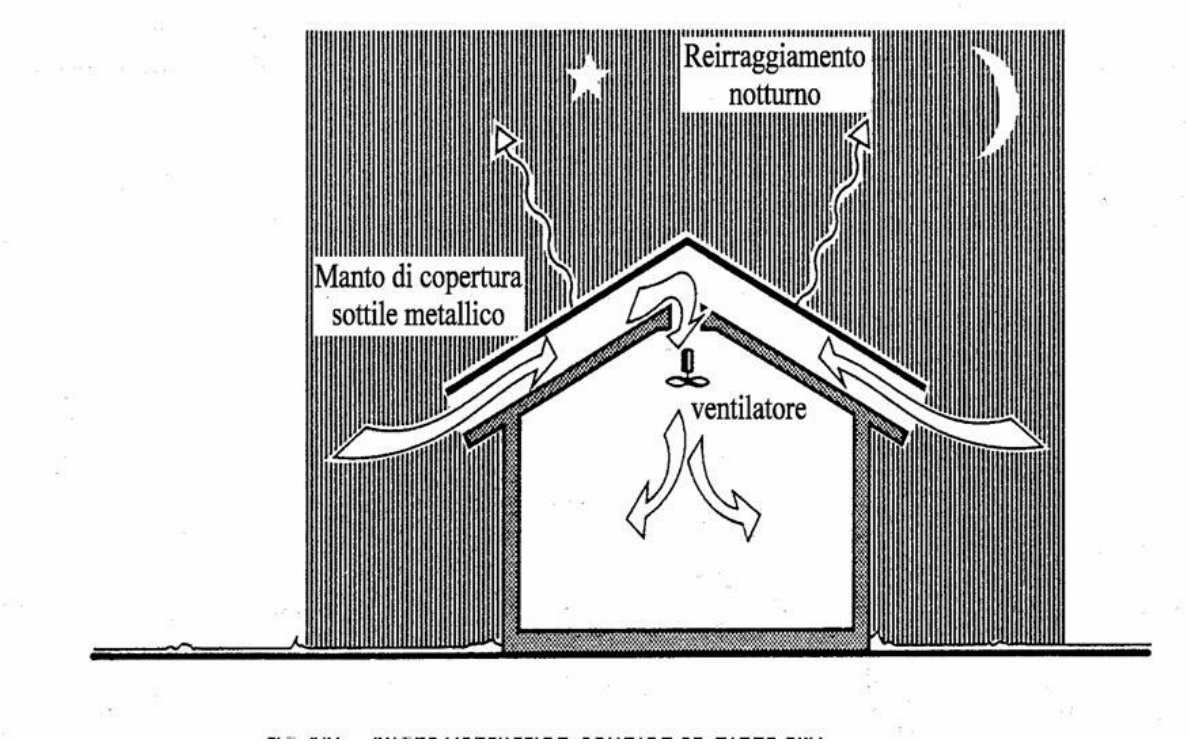

Fig. 10 – Sezione schematica di un sistema di raffrescamento radiativo indiretto ibrido

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1 Grosso, M., "La risorsa vento per la qualità dell'aria e il benessere", in *Ambiente Costruito: biotecnica-recupero-qualità in architettura*, n. 3/2000, Maggioli Ed., Rimini, 2000.

2 Grosso, M., *Il Raffrescamento Passivo degli Edifici*, Maggioli Ed., Rimini, 1997.

3 Fanchiotti A., "Un sistema naturale di raffrescamento delle ville palladiane: i Covoli", in *Spazio e Società*, n° 19, 1982.

4 Santamouris, M., Asimakopolous, D., *Passive cooling of buildings*, p.386, James & James, Londra, 1996.

5 Grosso, M., Oliaro, P., *Consalud's new Headquarters Building, Santiago de Chile: Consulting Contract for an Energy Efficient and Sustainable Design*, Final Report, DINSE, Politecnico di Torino, Dicembre 1998.

6 Fathy H., *Natural Energy and Vernacular Architecture*, University of Chicago Press, USA, 1986.